

혼합 가중치를 적용한 보강토 옹벽의 상태평가항목 가중치 평가

이형도¹, 원정훈^{2*}, 성주현³

Weighting Value Evaluation of Condition Assessment Item in Reinforced Earth Retaining Walls by Applying Hybrid Weighting Technique

Hyung Do Lee¹, Jeong-Hun Won^{2*}, Joohyun Seong³

Abstract: This study proposed the new weighting values and fault points of condition assessment items for reinforced earth retaining walls based on the combination the inspection data and hybrid weighting technique. Utilizing the inspection data of 161 reinforced earth retaining walls, multi regression analysis and entropy technique were applied to gain the weighting values of condition assessment items. In addition, the weighting values by AHP technique was analyzed based on the opinion of experts. By applying hybrid weighting technique to the calculated weighting values obtained by the individual technique, the new weighting values of condition assessment items were proposed, and the fault points and fault indices of reinforced earth retaining walls were proposed. Results showed that the rank of the weighting value of the condition evaluation items was fluctuated according to the multiple regression analysis, AHP technique, and entropy technique. There was no duplication of the rank of the weighting value while the current weighting value was overlapped. Specially, in the results of multi regression analysis, two condition assessment items were occupied 70% of the total weights. When the proposed weighting values were applied to existing reinforced earth retaining wall of 161, 16 reinforced earth retaining walls showed the increased risk rank and 31 represented the decreased risk rank.

Keywords: Weighting value, Condition evaluation items, Reinforced earth retaining wall, Multi regression analysis, Entropy technique, AHP

1. 서 론

보강토 옹벽은 흙속에 흙 입자와 마찰력이 탁월하고 강성이 큰 금속(스트립, 그리드 등) 또는 토목섬유 보강재(지오텍 스타일, 지오킴, 락 매트 등)를 삽입하여 금속 또는 토목섬유 보강재의 인장저항력과 흙과의 마찰저항력을 활용하여 수직에 가까운 보강토체를 형성한 구조물이며, 전면벽체, 보강재 및 뒤채움흙으로 구성된다. 보강토 옹벽은 콘크리트 옹벽에 비해 양호한 미관과 간단한 시공, 한정된 부지에서 시설물을 건설할 때 적합한 장점 등을 갖고 있어 1990년대 후반부터 콘크리트옹벽을 대체하여 보강토 옹벽의 건설 시장의 규모는 지속적으로 증가되고 있는 실정이다(Han et al., 2014).

미적 우수성과 시공 편의성으로 보강토 옹벽 공법을 적용

한 시공이 증가하면서 전문업체의 급속한 증가와 업체간의 경쟁이 심화되고 있으며, 부적절한 설계와 부실시공 등의 문제도 나타나고 있다(Park and Lee, 2012). 사고를 분석한 연구 결과를 보면, 붕괴사고의 주요한 원인은 지반조건이나 환경 조건을 적절히 고려하지 못하는 경우가 많은 것으로 나타나고 있다(Yoo et al., 2004; Han et al., 2005; Kim et al., 2013).

보강토 옹벽의 거동에 대한 국내의 연구는 다양한 측면에서 진행되어 왔다. 보강토 옹벽 토압에 대한 연구(Kim et al., 2004), 축소 모형 실험을 통한 안전성 검토(Yoo et al., 2005; Ju et al., 2011), 계측을 통한 안전성 검토(Kim et al., 2006), 수치 해석을 통한 안전성 검토(Song and Lee, 2007; Hong et al., 2013; Yoon et al., 2016), 보강토 옹벽의 복구 방안에 대한 연구(Won et al., 2013; Nam et al., 2017) 등 보강토 옹벽에 관련된 많은 연구들이 진행되어 왔다.

1995년에 시설물의 안전관리에 관한 특별법(이하 시특법)이 제정된 후 대통령령으로 정하는 교량·터널·항만·댐·건축물 등 1종 시설물과 2종 시설물의 안전점검 및 정밀안전진단이 실시되고 있다. 시특법 대상의 규모에 해당하는 보강토 옹벽의 경우에도 안전점검 및 정밀안전진단 결과 데이터는 지속적으로 축적되고 있으나, 점점 시 보강토 옹벽의 상태 등

¹정회원, 충북대학교 안전공학과 박사과정

²정회원, 충북대학교 안전공학과 교수, 교신저자

³정회원, 한국시설안전공단 시설성능연구소 유지관리기술그룹장

*Corresponding author: jhwon@chungbuk.ac.kr

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University, Chung Dea-ro1, Seowon-Gu, Chungju 362-763, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 11월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

급을 결정하는 평가항목과 항목의 가중치에 대한 개선은 이루어지지 않고 있다. 즉, 점검 및 진단결과를 토대로 보강토 웅벽의 상태평가항목과 가중치가 적절한지 평가하고 개선함으로써 보강토 웅벽의 노후화에 대비한 선제적 예방을 할 수 있음에도 기존의 연구들은 주로 지반과 구조적인 관점에서 진행되어 왔을 뿐, 보강토 웅벽의 안전성을 결정하는 상태평가항목의 가중치를 개선하는 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 축적된 안전점검 및 정밀안전진단 자료를 분석하여 안전점검 및 정밀안전진단 상태평가항목의 가중치를 개선하고자 하였다. 시설안전공단에 축적된 1, 2층 보강토 웅벽 161개소에 대한 점검결과 자료를 토대로 통계적 분석 방법인 다중회귀분석과 엔트로피 기법을 활용하여 보강토 웅벽의 상태평가항목들의 가중치를 산정하였으며, 전문가를 대상으로 의견을 도출하는 과정인 AHP(Analytical Hierarchy Process)방법도 실시하여 상태평가항목들의 가중치도 산정하였다. 산정된 개별 가중치를 활용하여 혼합 가중치를 제안하였으며, 제안된 혼합 가중치를 기존 현장 점검결과에 적용하였을 때 기존 가중치에 의한 점검결과와 대비해 보강토 웅벽의 위험도 등급의 변화를 비교하였다.

2. 가중치 산정 기법

혼합 가중치를 도출하기 위해서 객관적인 특성을 갖는 다중회귀분석과 엔트로피 기법, 주관적인 특성을 갖는 AHP 기법을 이용하여 가중치를 산정하였다.

2.1 다중회귀분석

두 개 이상의 변수가 포함된 회귀모형을 다중회귀모형이라 하며, n 개의 변수 $x_i (i=1,2,\dots,n)$ 에 대한 관측치를 y 라고 하면, 다중회귀모형의 일반식은 식 (1)과 같다.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_nx_n + \varepsilon \quad (1)$$

다중회귀모형에서 β_0 는 y 축 절편을 나타내며 β_i 는 x_i 를 제외한 나머지 변수가 종속변수에 미치는 효과를 제거한 후 변수 x_i 의 증분에 따른 종속변수 y 의 순수한 증분을 나타내는 값으로 i 번째 회귀계수라 한다. 즉, 다중회귀모형에서 회귀계수 β_i 는 모형에 포함되어 있는 모든 다른 독립변수들이 일정할 때 x_i 의 1단위 변화하는데 따른 y 의 변화량을 의미한다. 분석을 위하여 가지고 있는 데이터 $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}, y_i)$ 를 이용하여 설정한 다중회귀모형은 식 (2)와 같다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1x_{1i} + \beta_2x_{2i} + \dots + \beta_nx_{ni} + \varepsilon_i, (i = 1, \dots, n) \quad (2)$$

여기서, 독립변수 $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}$ 는 고정된 상수이며, 오차항 ε_i 의 평균은 0, 분산은 σ^2 이며, 오차항은 정규분포를 따른다. $\beta_i (i=0,1,2,\dots,n)$ 는 회귀계수로서 모수 추정에 의해 주어진 자료로부터 구한다.

2.2 AHP 기법

AHP 기법은 다중의사결정기법으로 의사결정 문제를 계층화한 후 상위 계층에 있는 평가 요소의 관점에서 하위 계층에 있는 요소들의 상대적 중요도를 쌍대비교에 의해 측정해 최하위 계층에 있는 대안들의 가중치 또는 우선순위를 구하는 기법이다(Balali et al., 2014). AHP 기법을 이용하여 의사결정 문제를 해결하기 위해서 일반적으로 Fig. 1과 같은 4단계 과정이 적용된다.

의사결정 분석자는 상호 관련된 여러 의사결정 사항들을 계층화하며, 최상층에는 가장 포괄적인 의사결정 목적을 배치하고 다음 계층에 의사결정의 목적에 영향을 미치는 다양한 요소들로 구성한다. 낮은 계층의 요소일수록 구체적이어야 하며, 한 계층내의 각 요소들은 서로 비교 가능하도록 비교 대상을 최대 7 ± 2 가지로 제한하도록 한다. Fig. 2는 3단계로 계층화된 AHP 계층 구조의 예이다.

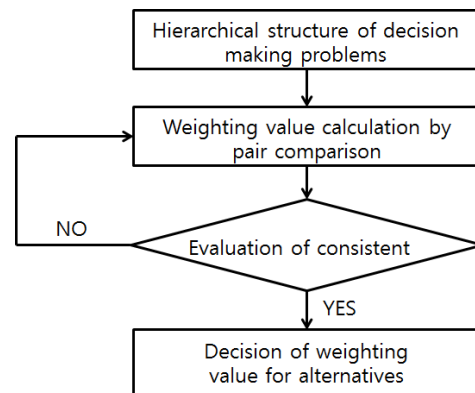


Fig. 1 Analysis phase of AHP

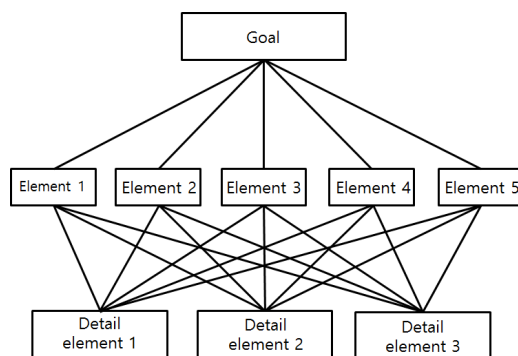


Fig. 2 Example of AHP hierarchy

Table 1 Random Index(RI)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Random index	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

쌍대비교를 통한 가중치 산출의 단계에서 상위계층 요소에 기여하는 정도를 직계하위계층의 요소에 9점 척도로 중요도를 부여한다. 직계 하위계층이 n개의 요소로 구성되어 있다면 $n/(n-1)/2$ 회의 비교를 실시한다. 작성된 쌍대비교행렬 A는 식 (3)과 같이 행렬의 대각의 중심으로 역수의 형태를 취한다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

쌍대비교행렬 A의 각 요소에 대한 가중치 w를 알 수 없다면, 이 행렬을 A'라 하고 이 행렬의 가중치 추정치 w'는 다음 식과 같다.

$$A' \times w' = \lambda_{\max} \times w' \quad (4)$$

여기서, λ_{\max} 는 행렬 A'의 최대고유치를 의미한다.

최대고유치(λ_{\max})가 n에 근접할수록 쌍대비교행렬 A의 수치들이 일관성을 가진다고 할 수 있으며, 일관성 정도는 다음 식 (5)와 (6)의 일관성지수(Consistency Index : CI)와 일관성 비율(Consistency Ratio : CR)을 통하여 구할 수 있다.

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (5)$$

$$CR = (CI / RI) \times 100\% \quad (6)$$

여기서, RI는 난수지수(Random Index)이며, n이 1에서 10으로 변화할 때의 난수지수는 Table 1과 같다. 경험법칙에 의해 위 식에서 구한 일관성비율이 10%이내에 들 경우, 해당 쌍대비교행렬은 일관성이 있는 것으로 간주한다.

2.3 엔트로피 기법

엔트로피 기법(Zou et al., 2006)은 의사결정자의 주관적 판단이 아닌 구성된 의사결정문제의 데이터에 의해서만 가중치를 계산하는 객관적인 기법으로 정보이론 방법을 적용하며, 정보량을 정량화하기 위해 최대 엔트로피, 결합 엔트로피, 조

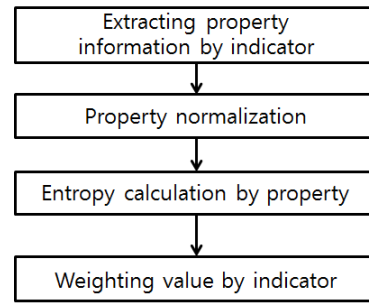


Fig. 3 Calculation process of entropy

건 엔트로피 및 정보전달량의 개념을 사용한다. 최대 엔트로피는 이산 무작위변량 $X = \{x_n\}$ 의 확률 $p(x_n)$ 분포가 가지는 엔트로피량으로 정의되며, 최대엔트로피 $H(X)$ 는 X가 가지고 있는 불확실성 또는 정보용량을 의미한다. 무작위 이산변수 X에 대해 최대엔트로피 $H(X)$ 는 식 (7)과 같이 정의된다 (Shannon and Weaver, 1994).

$$H(X) = - \sum_{\forall x} p(x) \times \ln p(x) \quad (7)$$

엔트로피 방법을 이용하여 지표별 가중치를 구하는 절차는 Fig. 3과 같다. 각 지표의 구축된 값을 이용해 행렬을 구성하고 구성된 지표별로 속성정보를 정규화하며, 정규화 자료를 이용하여 각 속성별 엔트로피를 산정한 후 최종적으로 지표간의 가중치를 결정한다.

정규분포형의 엔트로피 기법은 기준들 간의 가중치 추정 정보를 갖는 대안-속성 행렬로부터 가중치 벡터를 추정한다. 따라서 대안들 간의 차이가 클수록 기준의 중요성은 크다고 할 수 있다. 의사결정 문제는 식 (8)과 같이 행렬로 나타낼 수 있으며, 모든 속성에 대해서 정규화한 결과를 p_{ij} 라고 하면, p_{ij} 는 식 (9)와 같이 표시된다. 또한 각 속성의 엔트로피를 E_j 라고 하면, 엔트로피는 식 (10)으로 산정할 수 있다.

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \log p_{ij} \quad (k = \frac{1}{\log m}; j = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

여기서, x_{ij} 는 i 번째 보강토 옹벽의 j 번째 상태평가항목의 결합점수를 의미한다. 속성의 가중치를 구하기 위해서는 다양성 정도(d_j)를 사용하고, 다양성 정도는 $d_j = 1 - E_j$ 와 같이 계산하며, 각 속성에 대하여 정규화한 가중치(w_j)는 다음 식과 같다.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

엔트로피 기법을 활용하여 161개의 보강토 옹벽($m=161$)을 대상으로 12개의 상태평가항목($n=12$)에 대한 엔트로피를 구하고, 정규화한 가중치를 구하여 점검결과에 근거한 객관적인 상태평가항목의 가중치를 분석하였다.

3. 개별 기법을 이용한 가중치 산정 결과

3.1 현재 평가항목과 가중치

보강토 옹벽에 대한 현재 상태평가 항목은 침하, 계획선형 오차(전도/경사), 활동, 전면부 진행성 배부름, 파손/손상/균열, 유실, 이격, 세굴, 배수시설, 사면구배, 낙석흔적, 침출수로 구성되어 있다. 각 상태평가항목별 세부기준에 따라 a~e 등급별 결합점수를 산정하여 결합지수를 산정하고 있으며, 상태평가항목별 결합점수는 동일하지 않다(Korea Infrastructure Safety Cooperation, 2012). 중요도에 따라 결합점수가 다르며, 최대 점수인 e 등급을 기준으로 가중치(항목별 e 등급 점수/전체 e 등급 점수 합)를 산정하고 가중치 순위를 결정하면 현재의 상태평가항목의 가중치는 Table 2와 같다. 세굴의 가중치가 가장 높으며, 전면부 진행성 배부름과 유실이 다음으로 가중치가 높은 것을 알 수 있으며, 또한 가중치 순위가 중복된 상태평가항목이 있음을 알 수 있다.

3.2 다중회귀분석

기존 상태평가항목으로 평가된 161개소 보강토 옹벽의 점검결과를 활용하여 결합지수에서 각각 상태평가항목이 차지하는 회귀값을 산출하여 가중치로 적용하기 위해 다중회귀분석을 실시하였다. 다중회귀모형을 구축하기 위해 사용된 통계프로그램은 SPSS Ver. 23을 이용하였고 각각의 상태평가항목이 차지하는 회귀값을 구하기 위해 단계선택 입력방법으로 실행하였다. 사용된 자료는 시설안전공단에서 보유하고 있는 보강토 옹벽 161개소의 점검결과이다.

161개소에 대한 보강토 옹벽의 상태평가항목에 대한 회귀분석 모형을 보면 Table 3과 같이 독립변수로 진입된 12개의

Table 2 Weighting value of condition assessment item in current method

Condition assessment items	Current method	
	Weighting value	Rank
Scour	0.3077	1
Bulging	0.1539	2
Loss	0.1539	2
Sliding	0.0769	4
Destruction · damage or crack	0.0769	4
Separation	0.0769	4
Settlement	0.0385	7
Projected linear error	0.0385	7
Drain facility	0.0192	9
Slope gradient	0.0192	9
Evidence of falling rocks	0.0192	9
Leachate	0.0192	9

Table 3 Model summary of multi regression analysis

Model	R	R ²	Revised R ²	Standard error of estimated value	Variations of statistics					
					Variation of R ²	Variation of F	Degree of freedom 1	Degree of freedom 2	Variation of significance probability F	Durbin-Watson
1	.579 ^a	.335	.331	.044210	.335	79.550	1	158	.000	
2	.798 ^b	.637	.632	.032761	.302	130.721	1	157	.000	
3	.858 ^c	.737	.732	.027989	.100	59.098	1	156	.000	
4	.897 ^d	.805	.800	.024168	.068	54.229	1	155	.000	
5	.917 ^e	.841	.836	.021872	.036	35.252	1	154	.000	
6	.932 ^f	.868	.863	.020017	.027	30.872	1	153	.000	
7	.942 ^g	.888	.883	.018495	.020	27.208	1	152	.000	
8	.946 ^h	.894	.889	.018023	.006	9.066	1	151	.003	
9	.949 ⁱ	.900	.894	.017583	.006	8.661	1	150	.004	
10	.949 ^j	.901	.894	.017561	.001	1.367	1	149	.244	
11	.950 ^k	.902	.895	.017547	.001	1.238	1	148	.268	
12	.950 ^l	.902	.894	.017606	.000	.009	1	147	.924	1.563

- a. predictor: (constant), crack
- b. predictor: (constant), crack, bulging
- c. predictor: (constant), crack, bulging, scour
- d. predictor: (constant), crack, bulging, scour, separation
- e. predictor: (constant), crack, bulging, scour, separation, loss
- f. predictor: (constant), crack, bulging, scour, separation, loss, drain facility
- g. predictor: (constant), crack, bulging, scour, separation, loss, drain facility, linear error
- h. predictor: (constant), crack, bulging, scour, separation, loss, drain facility, linear error, slope gradient
- i. predictor: (constant), crack, bulging, scour, separation, loss, drain facility, linear error, slope gradient, leachate
- j. predictor: (constant), crack, bulging, scour, separation, loss, drain facility, linear error, slope gradient, leachate, sliding
- k. predictor: (constant), crack, bulging, scour, separation, loss, drain facility, linear error, slope gradient, leachate, sliding, settlement
- l. predictor: (constant), crack, bulging, scour, separation, loss, drain facility, linear error, slope gradient, leachate, sliding, settlement, evidence of falling rocks

Table 4 Calculated weighting value of condition assessment items using multi regression analysis

Condition assessment items	Multi regression analysis	
	Weighting value	Rank of the weighting value
Destruction·damage or crack	0.3713	1
Bulging	0.3351	2
Scour	0.1106	3
Separation	0.0757	4
Loss	0.0403	5
Drain facility	0.0295	6
Projected linear error	0.0222	7
Slope gradient	0.0070	8
Leachate	0.0064	9
Settlement	0.0010	10
Sliding	0.0009	11
Evidence of falling rocks	0.0000	12

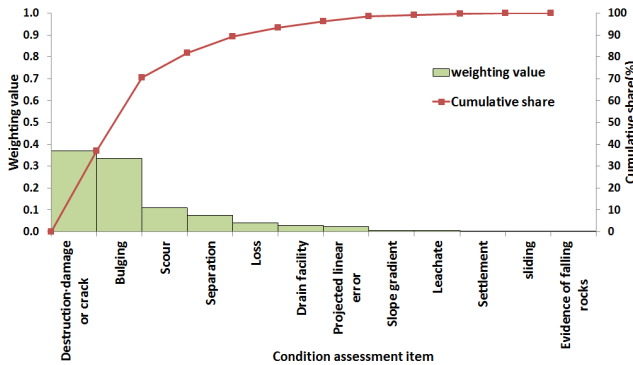


Fig. 4 Pareto chart of the multiple regression analysis

상태평가항목들과 종속변수인 결합지수의 총 분산의 설명력 (Revised R^2) 89.4%로 가장 높으며 상태평가항목이 모두 진입된 모형 12를 가중치 분석 모형으로 선정하였다. 표에서 Durbin-Watson 값은 회귀식을 만들기 전에 기본이 되는 가정이 잔차들의 독립성을 검정하는 항목으로 0~4의 값을 가지며, 2에 가까우면 잔차들이 독립이라고 볼 수 있다.

다중회귀분석을 이용하여 얻은 상태평가항목의 가중치 분석결과를 Table 4와 Fig. 4에 나타내었다. 다중회귀분석의 결과 가중치가 가장 높은 상태평가항목은 파손·손상 및 균열이 있으며, 다음으로 진행성 배부름, 세굴, 이격, 유실, 배수시설, 계획선형오차 순으로 가중치가 높은 것으로 분석되었다. 특히, 파손·손상 및 균열과 진행성 배부름 항목이 전체 가중치의 70% 이상을 차지하므로 보강토 옹벽의 상태평가에 가장 큰 영향을 주는 요인은 파손·손상 및 균열과 진행성 배부름 항목으로 분석되었다. 또한, 12개 상태평가항목의 가중치가 중

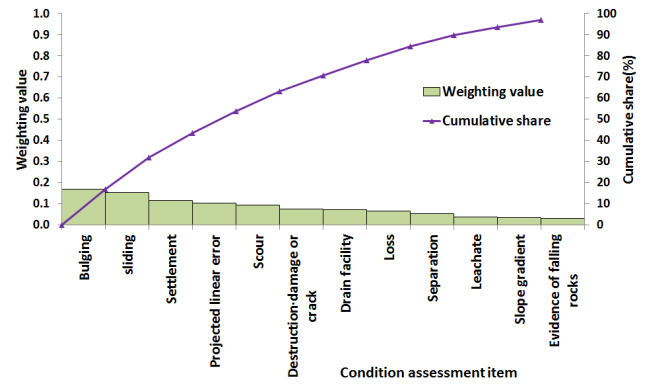


Fig. 5 Pareto chart of AHP results

복되는 현상은 발생하지 않았으며, 낙석흔적의 가중치의 경우 유효숫자 범위에서는 0.0000으로 표기되었으나 실제 가중치는 0.00001로 보강토 옹벽 상태에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

3.3 AHP 방법

보강토 옹벽의 12개 상태평가항목에 대하여 AHP 분석을 실시하여 가중치를 산출하였다. 보강토 옹벽의 상태평가항목 간 계층구조에서 Fig. 2와 같이 최상위 계층에 상태적 안전성이라는 최종 목표를 설정하였으며, AHP 분석에서 응답을 구한 전문가 응답 수는 21개이나, 일관성비율 10% 이내로 신뢰도 내에 있다고 분석된 응답 수 17개를 활용하여 결과를 분석하였다.

AHP 방법으로 도출된 가중치를 분석한 결과, 다중회귀분석 결과와는 다르게 특정 상태평가항목이 보강토 옹벽의 상태에 절대적인 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다(Fig. 5). 보강토 옹벽의 상태평가 항목별 가중치를 분석하면(Table 5), 전면부 진행성 배부름의 가중치가 가장 높게 나왔으며, 활동, 침하, 계획선형오차, 세굴, 파손·손상 및 균열, 배수시설 순으로 가중치가 높게 나오는 것으로 분석되었다. 또한 상태평가항목의 가중치가 중복되는 경우는 없는 것으로 분석되었다.

3.4 엔트로피 방법

한국시설안전공단의 161개소 보강토 옹벽 점검결과를 활용하여 엔트로피 방법을 적용하였으며, 엔트로피 방법으로부터 도출된 보강토 옹벽의 12개 상태평가항목의 가중치 분석결과를 Fig. 6과 Table 6에 나타내었다. 상태평가항목 중 사면구배의 가중치가 제일 높게 나왔고 활동, 세굴, 침하, 낙석흔적, 침출수, 전면부 진행성 배부름, 유실, 계획선형오차, 이격, 배수시설, 파손·손상 및 균열의 순으로 가중치 순위가 산정되었다. AHP 방법에서 도출된 가중치 분석결과와 같이 상태평가항목들 중 특정 항목의 가중치가 크지 않은 형태의 가중치

Table 5 Calculated weighting value of condition assessment items using AHP

Condition assessment items	AHP method	
	Weighting value	Rank of the weighting value
Bulging	0.1674	1
Sliding	0.1517	2
Settlement	0.1162	3
Projected linear error	0.1025	4
Scour	0.0936	5
Destruction·damage or crack	0.0761	6
Drain facility	0.0711	7
Loss	0.0663	8
Separation	0.0535	9
Leachate	0.0381	10
Slope gradient	0.0328	11
Evidence of falling rocks	0.0308	12

Table 6 Calculated weighting value of condition assessment items using entropy method

Condition assessment items	Entropy method	
	Weighting value	Rank of the weighting value
Slope gradient	0.1377	1
Sliding	0.1182	2
Scour	0.1158	3
Settlement	0.1032	4
Evidence of falling rocks	0.1007	5
Leachate	0.0914	6
Bulging	0.0840	7
Loss	0.0829	8
Projected linear error	0.0694	9
Separation	0.0534	10
Drain facility	0.0313	11
Destruction·damage or crack	0.0120	12

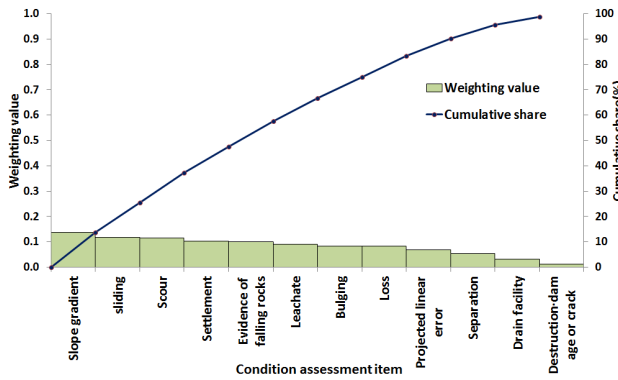


Fig. 6 Pareto chart of entropy method results

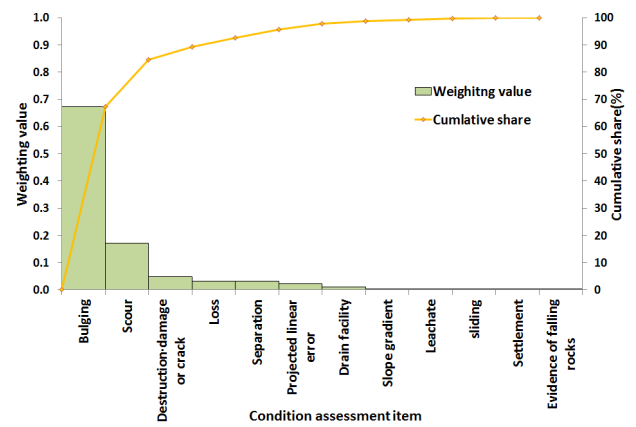


Fig. 7 Pareto chart of mixed weight

누적상승 곡선을 나타내므로(Fig. 6) 상태평가항목 중 특정 항목의 가중치들이 보강토 옹벽의 상태평가에 절대적 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

4. 혼합 가중치 제안

4.1 혼합 가중치의 도출

AHP 방법, 다중회귀분석, 엔트로피 방법에서 각각 도출한 가중치의 편차가 크므로, 혼합 가중치를 산정하였다. 혼합 가중치(λ)는 다음의 식을 활용하여 산출하였다(Kim et al., 2007).

$$\lambda_i = \frac{A_i \times B_i \times C_i}{\sum_{i=1}^n A_i \times B_i \times C_i} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (12)$$

여기서, A는 AHP 방법의 가중치, B는 다중회귀분석의 가중치, C는 엔트로피의 가중치이다.

각 개별 가중치들을 혼합하여 도출한 혼합 가중치를 Fig. 7 과 Table 7에 나타내었다. 혼합 가중치를 이용하여 보강토 옹벽의 상태평가항목 별 가중치를 산정한 결과 상태평가항목 중 전면부 진행성 배부름과 세굴의 가중치가 전체 가중치의 84% 이상을 차지하며 보강토 옹벽의 상태평가에 절대적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 표로부터 가중치 순위의 중복은 없으며, 전면부 진행성 배부름의 가중치가 가장 높으며, 세굴, 파손·손상 및 균열, 유실, 이격, 계획선형오차, 배수시설, 사면구배, 침출수, 활동, 침하, 낙석흔적의 순으로 혼합 가중치의 순위가 산정되었다.

Table 7 Weighting values of condition assessment items calculated by mixed weighting method

Condition assessment items	Mixed weighting method	
	Weighting value	Rank of the weighting value
Bulging	0.6738	1
Scour	0.1712	2
Destruction·damage or crack	0.0486	3
Loss	0.0316	4
Separation	0.0309	5
Projected linear error	0.0226	6
Drain facility	0.0094	7
Slope gradient	0.0045	8
Leachate	0.0032	9
Sliding	0.0026	10
Settlement	0.0016	11
Evidence of falling rocks	0.0000	12

Table 8 Weighting values and ranks of individual condition assessment items according to analysis method

Items	Current method		Multi regression analysis		Entropy		AHP		Mixed weight	
	WV*	Rank	WV	Rank	WV	Rank	WV	Rank	WV	Rank
	Settlement	0.0385	7	0.0009	11	0.1032	4	0.1162	3	0.0016
Projected linear error	0.0385	7	0.0222	7	0.0694	9	0.1025	4	0.0226	6
Sliding	0.0769	4	0.0010	10	0.1182	2	0.1517	2	0.0026	10
Bulging	0.1539	2	0.3351	2	0.0840	7	0.1674	1	0.6738	1
Destruction·damage or crack	0.0769	4	0.3713	1	0.0120	12	0.0761	6	0.0486	3
Loss	0.1539	2	0.0403	5	0.0829	8	0.0663	8	0.0316	4
Separation	0.0769	4	0.0757	4	0.0534	10	0.0535	9	0.0309	5
Scour	0.3077	1	0.1106	3	0.1158	3	0.0936	5	0.1712	2
Drain facility	0.0192	9	0.0295	6	0.0313	11	0.0711	7	0.0094	7
Slope gradient	0.0192	9	0.0070	8	0.1377	1	0.0328	11	0.0045	8
Evidence of falling rocks	0.0192	9	0.0000	12	0.1007	5	0.0308	12	0.0000	12
Leachate	0.0192	9	0.0064	9	0.0914	6	0.0381	10	0.0032	9

* Weighting value

4.2 혼합 가중치와 재산정된 가중치 비교·분석

현재 적용되고 있는 상태평가항목의 가중치와 측정 자료로부터 통계적으로 분석된 다중회귀분석, 엔트로피 기법의 가중치와 전문가의 주관적인 의견이 반영된 AHP 기법의 가중치, 그리고 혼합가중치의 값과 가중치 순위를 비교하여 Fig. 8 과 Table 8에 나타내었다.

개별 가중치를 비교·분석한 결과 상태평가항목의 전반적인 변동이 발생하였으며 각 항목마다 각 평가기법이 가지는 특성에 의해서 서로 다른 가중치 순위가 발생하는 것을 확인

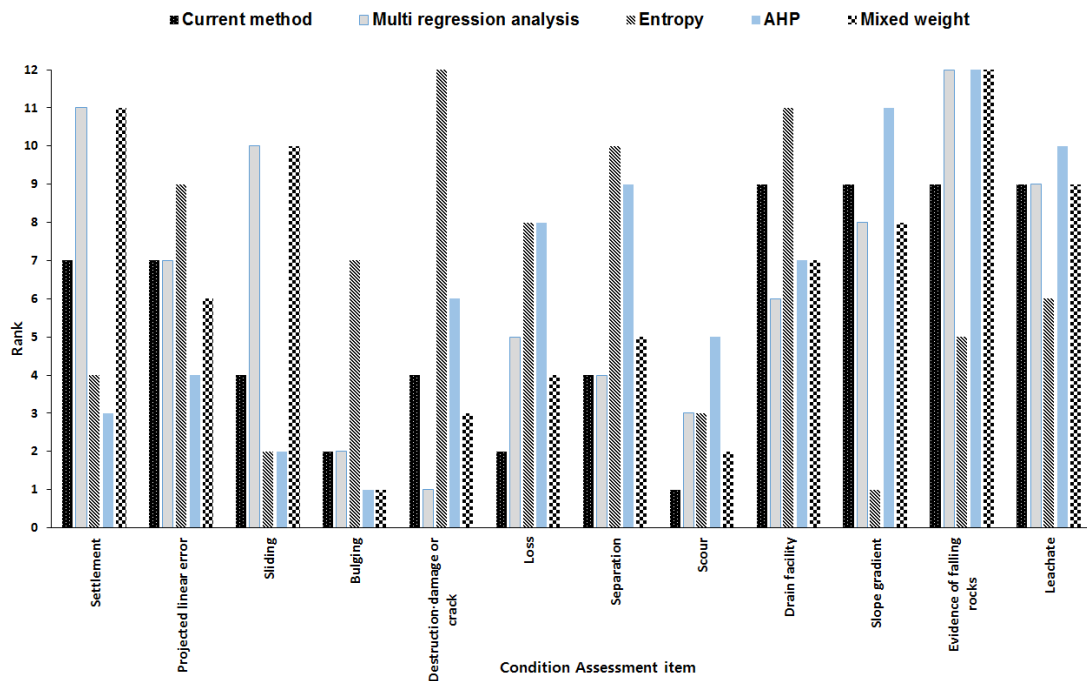


Fig. 8 Comparison of individual condition assessment item's rank according to analysis method

할 수 있다. 다중회귀분석의 가중치와 혼합 가중치의 순위가 비교적 유사하게 나타났으며, 기존 상태평가항목 가중치에서 있었던 중복 순위가 다른 기법의 가중치에서는 발생하지 않았다.

기존 상태평가항목 가중치, 각 개별 가중치, 혼합 가중치 간의 상관성과 혼합 가중치에 각 개별 가중치가 미친 영향을 분석하기 위하여 통계프로그램 SPSS Ver. 23을 이용하여 상관 분석을 수행하였다. 상관분석은 Spearman 상관계수를 유의 수준 $\alpha = 0.05$ 에서 실시하였으며(Won and Han, 2010), 혼합 가중치, 다중회귀분석의 가중치, 엔트로피 기법의 가중치, AHP 기법의 가중치, 현재 상태평가항목 가중치 간 순위상관분석 결과는 Table 9와 같다.

표로부터 혼합 가중치와 다중회귀분석의 경우 상관계수가 0.937로 강한 양(+)적 선형관계를 보이며, 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에서 통계적으로 유의미하다고 분석되었다. 혼합 가중치와 현재 상태평가항목 가중치의 경우 상관계수가 0.727로 강한 양(+)적 선형관계를 보이며, 또한 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에서 통계적으로 유의미하다고 분석되었다. 혼합가중치의 경우 기존 방법의 점검결과를 토대로 계산되었기 때문에 다른 기법으로 산정된 가중치보다 상관관계가 높게 분석되었다. 반면 혼합

가중치와 엔트로피 기법, AHP 기법과의 상관성은 $\alpha = 0.05$ 에서 통계적으로 유의하지 않다고 분석되었으며, 각 기법들이 가지는 특성이 다르므로 상관관계 낮은 것으로 분석되었다. 따라서 혼합 가중치에 다중회귀분석과 현재의 상태평가항목 가중치가 큰 영향을 미친 것으로 판단되었다.

5. 분석결과의 응용

5.1 혼합 가중치를 적용한 상태평가항목 결합점수 및 결합지수 제안

다중회귀분석, 엔트로피 기법, AHP 기법을 이용하여 도출한 혼합 가중치 순위를 토대로 보강토 옹벽의 상태를 평가하는 상태평가항목의 결합점수 및 결합지수를 제안하였다. 제안한 혼합 가중치는 기존 자료를 활용한 객관적 의사결정과 전문가의 의견을 반영하여 보완한 것으로 보강토 옹벽의 상태평가에 보다 효과적인 것으로 판단된다. 결합점수 제안 시 현재 상태평가항목과 비교하여 항목간의 중복되는 점수가 없도록 일정 점수차이를 두어 산정하였다. 상태평가항목에 대한 현재의 결합점수 수준과 제안된 결합점수 수준을 Table 10과 같이 5단계(very high, high, medium, low, very low)로 구분하였다. 현재 상태평가항목의 결합점수는 중복을 허용하며, 1점, 2점, 4점, 8점, 16점으로 편차가 지나치게 크나, 제안한 결합점수는 12개 항목에 대해 중복점수 없이 1점에서 20점까지 순차적으로 부여한 방법이다.

혼합 가중치에 근거하여 본 연구에서 제안한 보강토 옹벽

Table 9 Results of correlation analysis of priority among methods

Classification		Mixed weight	Multi regression analysis	Entropy	AHP	Current method
Mixed weight	Coefficient of correlation	1	0.937**	-0.336	0.378	0.727**
	Significant	-	0.000	0.286	0.226	0.007
	N	12	12	12	12	12
Multi regression analysis	Coefficient of correlation	0.937**	1	-0.538	0.259	0.655*
	Significant	0.000	-	0.071	0.417	0.021
	N	12	12	12	12	12
Entropy	Coefficient of correlation	-0.336	-0.538	1	0.007	-0.054
	Significant	0.286	0.071	-	0.983	0.868
	N	12	12	12	12	12
AHP	Coefficient of correlation	0.378	0.259	0.007	1	0.561
	Significant	0.226	0.417	0.983	-	0.058
	N	12	12	12	12	12
Current method	Coefficient of correlation	0.727**	0.655*	-0.054	0.561	1
	Significant	0.007	0.021	0.868	0.058	-
	N	12	12	12	12	12

* significant, $\alpha = 0.05$

** significant, $\alpha = 0.01$

Table 10 Fault point of current and proposed method according to importance level

	Current method		Proposed method based on mixed weight	
	Level	Fault point	Level	Fault point
Very high	1	16	1	20
			2	19
High	2	8	3	12
			4	11
Medium	4	4	5	8
			6	7
Low	7	2	7	6
			8	5
Very low	9	1	9	4
			10	3
			11	2
			12	1

Table 11 Proposed fault scores and fault coefficient (F) for reinforced earth retaining walls

Condition assessment items	a	b	c	d	e
	$0 \leq f < 0.15$	$0.15 \leq f < 0.30$	$0.30 \leq f < 0.55$	$0.55 \leq f < 0.75$	$0.75 \leq f$
Settlement	0	0	1	1	2
Projected linear error (drop/slope)	0	2	3	5	7
Sliding	0	0	1	2	3
Progressive swell of front surface	0	5	10	15	20
Destruction, damage or crack	0	3	6	9	12
Loss	0	2	5	8	11
Separation	0	2	4	6	8
Scour	0	4	9	14	19
Drain system	When the drain facility is in good condition: 0, no drain facility or that in bad condition: 1				
Peripheral impacting factors condition	Slope gradient	Adequate	0	Inadequate	5
	Evidence of falling rock	Not occurred	0	Occurred	1
	Leachate	None	0	Existed	4
Reinforced earth retaining wall fault index (F)	①	$\frac{\sum F_{\text{faultpoint}}}{98}$	②	$\frac{\sum F_{\text{faultpoint}}}{79}$	

의 상태평가항목들에 대해 등급별 결합점수 및 결합지수를 Table 11과 같이 제안하였다. 보강토 옹벽의 결합지수(F)의 경우 각 등급의 배점이 재산정 되었기에 ① 산정식과 ② 산정식의 경우 분모값을 변경하였다. 다만, ② 산정식은 세굴 발생이 가능한 부위가 불투수(아스콘, 콘크리트포장)가 되었을 경우 적용한다.

5.2 혼합 가중치의 현장적용

현재 가중치와 제안 혼합 가중치 적용에 따른 161개 보강토 옹벽의 위험도 영역의 변화를 분석하기 위해 PROMETHEE 방법을 적용하였다(Min and Song, 2003). PROMETHEE 방법의 적용을 위해 상태평가항목별 선호함수, 선호임계치를 결정하였으며, 선호지수와 대안별 순위선호체계에 따라 보강토 옹벽의 위험도 순위를 결정하였다. PROMETHEE 기법에 적용되는 선호함수는 V형 함수를 선정하였으며 V형의 선호임계치 설정은 각 평가항목의 최대값에서 최소값의 차를 적용하여 평가항목의 범위 내의 값으로 설정하였다(Table 12).

표에서 최대값과 최소값은 전체 보강토 옹벽 개소 중 가장 큰 값과 작은 값을 말하며, 선호임계치는 최대값과 최소값의 차이에 의해 구하였다. 선호방향(+)일 때 평가지표의 값이 커질수록 선호성향이 커짐을 의미하고, 선호방향(-)일 때 평가지표의 값이 작을수록 선호성향이 커짐을 의미한다. 따라서 평가항목 결합이 클수록 보강토 옹벽 안전성 순위를 낮게 판정하였다.

현재의 상태평가항목 가중치 값과 제안한 혼합 가중치 순

Table 12 Preferred function and threshold of each condition assessment item

Condition assessment item	Preference direction (+, -)	Preference function	Preference		Preference critical value
			Max	Min	
Settlement	+	V type	1	0	1
Projected linear error	+	V type	2	0	2
Sliding	+	V type	2	0	2
Bulging	+	V type	6	0	6
Destruction-damage or crack	+	V type	3	0	3
Loss	+	V type	4	0	4
Separation	+	V type	4	0	4
Scour	+	V type	8	0	8
Drain facility	+	V type	2	0	2
Slope gradient	+	V type	2	0	2

Table 13 The number of retaining walls showing risk area change by applying proposed method comparing to the current method

	The number of retaining walls		
	With same risk area	Increased risk area	Decreased risk area
Risk area 1	0	0	0
Risk area 2	52	3	28
Risk area 3	39	5	1
Risk area 4	5	8	2
Risk area 5	18	0	0
All	114	16	31

위의 가중치 값을 각각 PROMETHEE 기법에 적용하여 보강토 옹벽 161개소에 대한 위험도 순위를 산정하였다. 위험도 순위는 선호유출량과 선호유입량의 차이로 도출된 선호흐름량(NF) 값을 통해 확률변수 식 (13)을 통해 5개의 영역으로 나누고 상위 영역부터 5부터 1까지의 순서를 부여하였다.

$$P(X=x) = \frac{NF_i - m}{\sigma} \quad (13)$$

여기서, m은 선호흐름량의 평균을, σ 는 선호흐름량의 표준편차를 의미한다. 식 (13)은 표준정규분포 $N(0, 1^2)$ 을 가정한 것으로 위험영역 5는 $0.85 < P \leq 1.0$, 위험역역 4는 $0.26 < P \leq 0.85$, 위험영역 3은 $-0.26 < P \leq 0.26$, 위험영역 2는 $-0.85 < P \leq -0.26$, 위험영역 1은 $-1.0 \leq P \leq -0.85$ 로 가정하였다. 위험영역 1은 안전정인 상태이며, 위험영역 5는 당장 보수나 대책이 필요한 상태이다.

제안한 혼합 가중치를 현장 161개소의 적용한 결과와 현재 상태평가항목 가중치를 적용한 결과를 비교·분석하여 Table 13에 나타내었다. 혼합 가중치에 근거한 제안 방법을 적용한 결

과 현재 상태평가항목 가중치로 평가한 결과와 비교하여 총 161개의 현장 중 위험도 순위가 변동이 없는 경우는 114개소, 상승한 경우는 16개소, 하락한 경우는 31개소로 나타났다. 5개 영역의 개별 결과를 분석한 결과, 위험도 하위인 1번의 경우는 없었으며, 위험도 2번의 경우 위험도 순위가 변동이 없는 경우는 52개소, 상승한 경우는 3개소, 하락한 경우는 28개소로 분석되었다. 위험도 중간인 3번의 경우 위험도 순위가 변동이 없는 경우는 39개소, 상승한 경우는 5개소, 하락한 경우는 1개소로 나타났다. 위험도 4번의 경우 위험도 순위가 변동이 없는 경우는 5개소, 상승한 경우는 8개소, 하락한 경우는 2개소로 나타났다. 위험도 상위인 5번의 경우 위험도 순위가 변동이 없는 경우는 18개소, 상승한 경우와 하락한 경우는 없는 것으로 분석되었다.

6. 결론

본 논문에서는 총 161개소의 국내 보강토 옹벽 현장 점검결과를 근거로 다중회귀분석과 엔트로피 기법을 이용하여 상태평가항목별 가중치를 산정하였으며, 또한 전문가를 대상으로 AHP 기법을 활용하여 평가항목별 가중치를 산정하였다. 각 기법의 가중치를 이용하여 혼합 가중치를 산정하고, 혼합 가중치를 토대로 결합점수 및 결합지수를 제안하여 기존 161개소 현장에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 개별기법에서 선정된 가중치를 분석한 결과, 현재 상태평가항목은 세굴의 가중치가 가장 높으며, 전면부 진행성 배부름과 유실이 다음으로 가중치가 높은 것으로 분석되었다. 반면, 데이터 분석에 기초한 다중회귀분석에서는 파손·손상 및 균열의 가중치가 가장 높으며, 다음으로 진행성 배부름으로 분석되었다. AHP 방법에서는 전면부 진행성 배부름의 가중치가 가장 높으며, 엔트로피 방법에서는 사면구배의 가중치가 제일 높은 것으로 분석되었다.
- 2) 혼합 가중치를 도출하여 상태평가항목 별 가중치를 산정한 결과, 전면부 진행성 배부름과 세굴의 가중치가 전체 가중치의 84% 이상을 차지하므로 전면부 진행성 배부름과 세굴이 보강토 옹벽의 상태평가에 절대적인 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 혼합가중치, 개별 가중치, 현재 상태평가 가중치에 대해 상관분석을 실시한 결과, 혼합 가중치에 다중회귀분석과 현재의 상태평가항목 가중치가 큰 영향을 미친 것으로 분석되었다.
- 3) 혼합가중치를 적용한 상태평가항목 결합점수 및 결합지수를 제안하여 161개 보강토 옹벽에 적용한 결과, 현재 상태평가항목 가중치의 위험도 순위와 비교하여 총 161개소 중 16개소에서 위험도의 상승이 발생하고 31개소 위험도

의 하락이 발생하였다. 위험도 하락의 경우는 낮은 위험도에서 대부분 발생하였고 위험도 상승의 경우는 높은 위험도에서 주로 발생하는 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 한국시설안전공단인의 보강토 옹벽 및 돌망태 옹벽 분야 성능평가항목 분석연구의 일환으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Balali, V., Zahraie, B., and Roozbahani, A. (2014), A Comparison of AHP and PROMETHEE Family Decision Making Methods for Selection of Building Structural System, *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2(5), 149-159.
- Han, J. G., Cho, S. D., Jeong, S. S., Lee, K. W., and Hong, K. K. (2005), Case Study on Global Slope Failure Case of Segmental Retaining Wall, *Journal of The Korean Geosynthetics Society*, 4(2), 47-56 (in Korean).
- Han, J. G., Kim, M. W., Hong, K. K., and Yun, J. M. (2014), Stability evaluation of reinforced earth walls based on large-scale modular blocks, *Journal of The Korean Geosynthetics Society*, 13(4), 143-151 (in Korean).
- Hong, K. K., Han, J. G., Lee, J. Y., and Park, J. S. (2013), Analysis on Failure Causes and Stability of Reinforced Earth Wall Based on a Field Case, *Journal of The Korean Geosynthetics Society*, 12(1), 109-114 (in Korean).
- Ju, J. W., Park, J. B., and Na, H. H. (2011), Bulging of Reinforced Retaining Walls, *Journal of The Korean Geosynthetics Society*, 10(2), 45-53 (in Korean).
- Kim, B. I., Yu, W. K., Kim, K. M., and Lee, B. Y. (2013), A Case Study on Collapsed Geosynthetic Reinforced Segmental Retaining Wall, *Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 14(4), 2006-2012 (in Korean).
- Kim, C. S., Lee, M. K., and Lim, S. U. (2007), A Study on the Plan for Enhancing Internal Customer Satisfaction for Hybrid Weight, *Journal of the Safety Management & Science*, 9(6), 205-214 (in Korean).
- Kim, J. M., Cho, S. D., Lee, J. J., and Paik, Y. S. (2004), An Experimental Study on Characteristics of Earth Pressure Distribution for Segmental Reinforced Earth Wall, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 20(1), 83-90 (in Korean).
- Kim, J. M., Lee, D. Y., and Ma, S. J. (2006), Site Monitoring of the Retaining Wall Reinforced by Geogrids with Block Type Facings, *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 10(1), 106-114 (in Korean).
- Korea Infrastructure Safety Corporation(2012), Guidance of Safety Check and Detailed Inspection for Retaining Wall (In Korean).
- Min, J. H. and Song, Y. M. (2003), PROMETHEE for Multicriteria Decision Making, *Sogang Journal of Business*, 14(2), 109-127 (in

- Korean)
- Nam, M. S., Do, J. N., and Kim, H. J. (2017), A Case Study of Repair and Rehabilitation on Reinforced Earth Wall, Proceedings for conference of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 389-390 (In Korean).
- Park, J. K. and Lee, K. W. (2012), A Study on Practices and Troubles of Reinforced Soil Wall, *Journal of The Korean Geosynthetics Society*, 11(1), 65-75 (in Korean).
- Song, Y. S. and Lee, B. S. (2007), A Case Study of Investigating Appropriate Replacement Area for the Stability of Reinforced Retaining Walls on Soft Ground, *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 11(6), 113-119 (In Korean).
- Shannon, C. E. and Weaver, W. (1949), *The Mathematical Theory of Communication*, The University of Illinois Press, Urbana, Illinois, USA.
- Won, C. H. and Han, K. S. (2010), The Optimal Performance Evaluation Method for the Evaluation of Performance Persistency of Stock Funds, *Korean Association of Industrial Business Administration*, 25(4), 395-422 (in Korean).
- Won, M. Soo., Kim, H. J., Kim, Y. S., and Choi, J. H. (2013), A Case Study on the Restoration of Collapsed Geosynthetics Reinforced Soil Wall Using Limit Equilibrium and Numerical Analyses, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 29(11), 107-118 (in Korean).
- Yoo, C. S., Jeon, S. S., Kim, K. Y., Jung, H. S., Lee, B. W., and Jeon, H. Y. (2005), Failure Mechanism of Geosynthetic Reinforced Segmental Retaining Wall in Tiered Configuration Using Reduced-scale Model Tests, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 21(3), 65-77 (in Korean).
- Yoo, C. S., Jung, H. S., and Lee, S. W. (2004), A Case Study of The Collapsed Reinforced-Soil Retaining Wall, *Journal of The Korean Geosynthetics Society*, 3(2), 13-21 (in Korean).
- Yoon, W. S., Park, J. K., and Chae, Y. S. (2016), A Study on the Characteristics of Behavior of Block-type Reinforced Earth Retaining Wall Considering Failure Surface, *Journal of The Korean Geosynthetics Society*, 15(3), 13-26 (in Korean).
- Zou, Z. H., Yun, Y., and Sun, J. N. (2006), Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment, *Journal of Environment Sciences*, 18(5), 1020-1023.

Received : 05/04/2017

Revised : 06/21/2017

Accepted : 08/21/2017

요 지 : 본 연구에서는 보강토 옹벽 점검 자료를 바탕으로 보강토 옹벽의 상태평가항목의 가중치를 새롭게 제안하고 결합점수 및 결합지수를 제안하였다. 161개소의 보강토 옹벽의 점검결과를 근거로 다중회귀분석과 엔트로피 기법을 이용하여 상태평가항목별 가중치를 산정하였으며, 또한 전문가를 대상으로 AHP 기법을 활용하여 평가항목별 가중치를 산정하였다. 각 기법에서 도출된 가중치를 활용하여 혼한 가중치를 제안하였으며, 제안 가중치를 토대로 결합점수 및 결합지수를 제안하여 기존 161개소 현장에 적용하여 현재의 가중치와 제안 가중치에 의한 현장별 위험도 순위를 비교 분석하였다. 다중회귀분석, AHP 기법, 엔트로피 기법을 활용하여 분석한 결과 상태평가항목의 가중치 순위가 변동이 컸으며, 현재 상태평가항목의 가중치와 달리 가중치 순위의 중복은 발생하지 않았다. 특히, 다중회귀분석 결과에서는 특정 상태평가항목이 전체 가중치의 70% 이상을 차지하는 결과가 도출되었다. 제안한 혼합 가중치를 기존 보강토 옹벽 데이터에 적용한 결과, 상태평가항목의 가중치 중복은 발생하지 않았으며, 대상 보강토 옹벽 161개소 중 16개소의 위험도 순위 상승과 31개소의 위험도 하락이 발생하였다.

핵심용어 : 보강토 옹벽, 상태평가항목, 다중회귀분석, 엔트로피 기법, AHP 기법, 혼합 가중치
